



Gleit- und Wälzlagerungen in Windenergieanlagen Simulation und Experiment

**Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen
Technische Universität Clausthal**

Prof. Dr.-Ing. H. Schwarze

**Vortrag Rotary Club Clausthal-Zellerfeld
20. September 2022**



Institut für Tribologie

CUTECH



ITR Forschungsaktivitäten

- Modellieren im Bereich Festkörpermechanik und Tribologie
- Modellieren im Bereich Strömungsmechanik und Rheologie
- Fluid Struktur Interaktion
- Triboexperiment und online Verschleißdiagnose

Mitarbeiter/-innen:

16 wiss. Mitarbeiter*innen

12 techn. Mitarbeiter*innen

www.itr.tu-clausthal.de

Einrichtungen:

30 Tribo-Prüfstände (2500 m²)

6 Gleitlagerprüfstände

3 Wälzlagerprüfstände

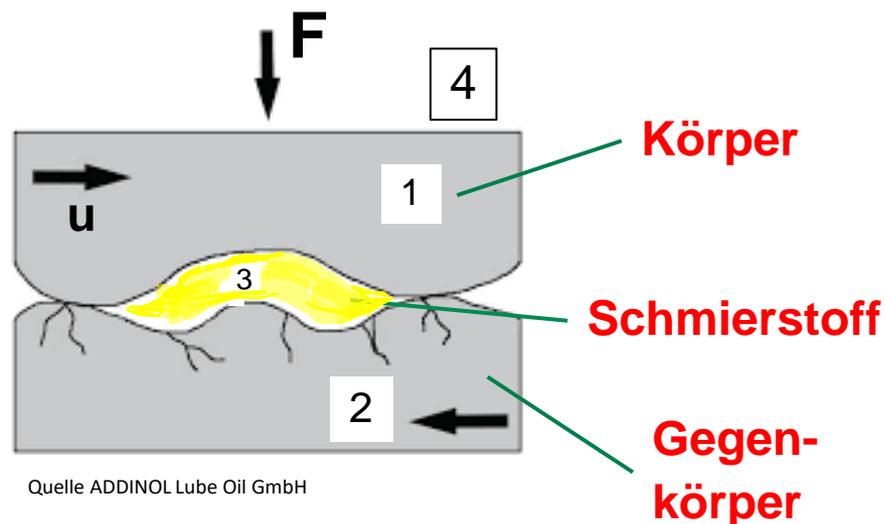
Labore: Tribochemie, Rheologie

RNT-Verschleißanalyse

Was ist Tribologie?

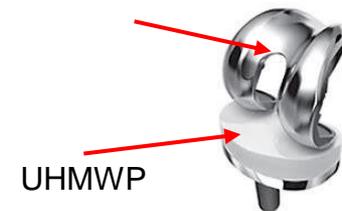
Tribologie beschreibt die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden und sich in Relativbewegung befindlicher Oberflächen und alle damit verbundenen Probleme. Typische Elemente sind Reibung, Verschleiß und Schmierung. Die Tribologie befasst sich mit den Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Festkörpern sowie die Wechselwirkung zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen.

Definition der GFT-Gesellschaft für Tribologie

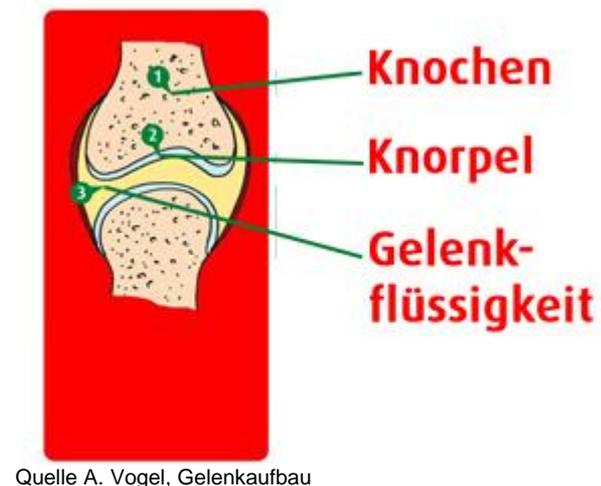


Quelle ADDINOL Lube Oil GmbH

Titan, St, DLC

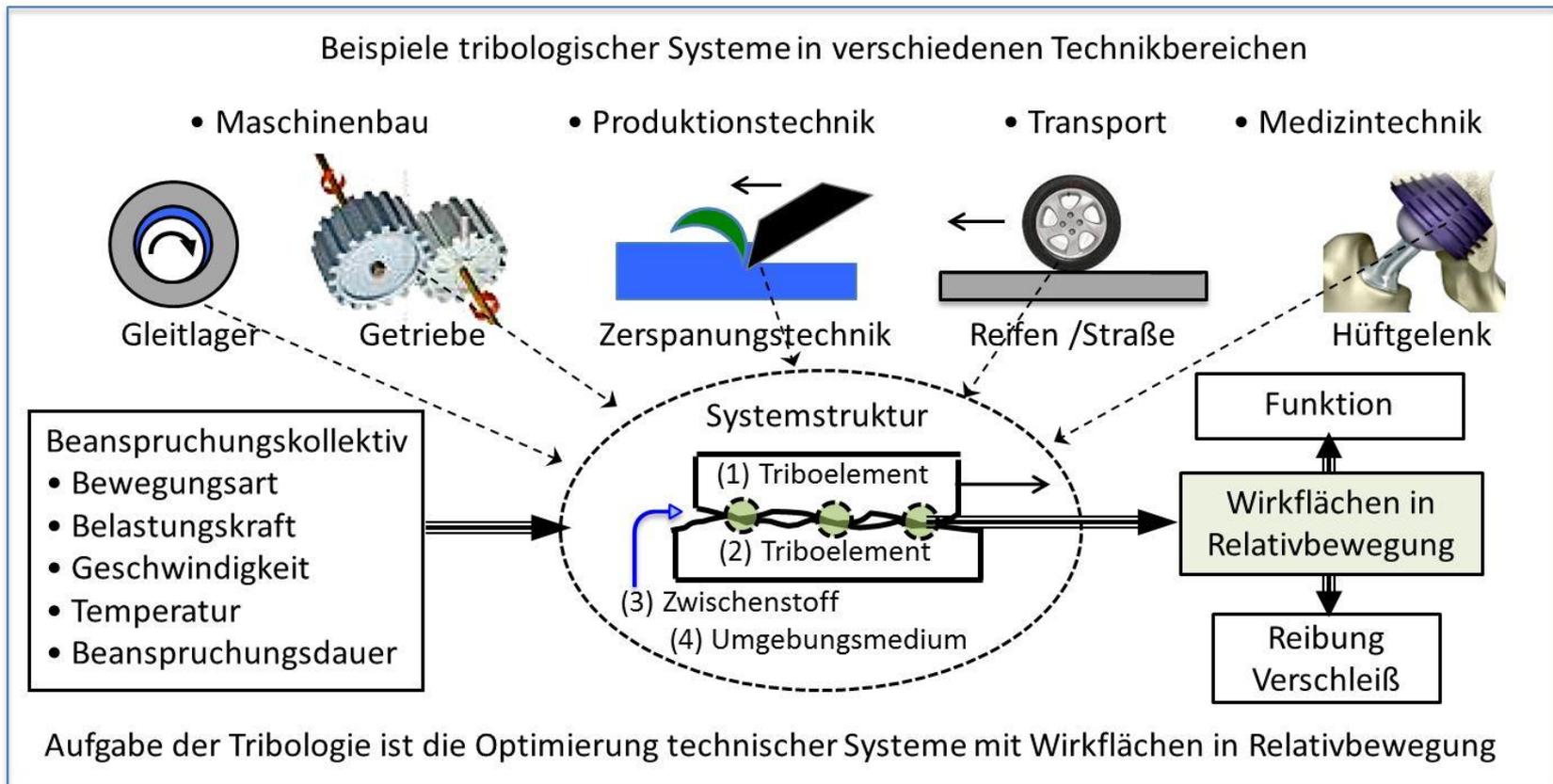


Quelle Wiki



Quelle A. Vogel, Gelenkaufbau

Tribologie (griech.: Reibungslehre)



Quelle: H. Czichos: Tribologie – 50 Jahre interdisziplinäre Reibungs- und Verschleißforschung, Materials Testing, 58 (2016) 921

Lagerungsmöglichkeiten für Radiallager



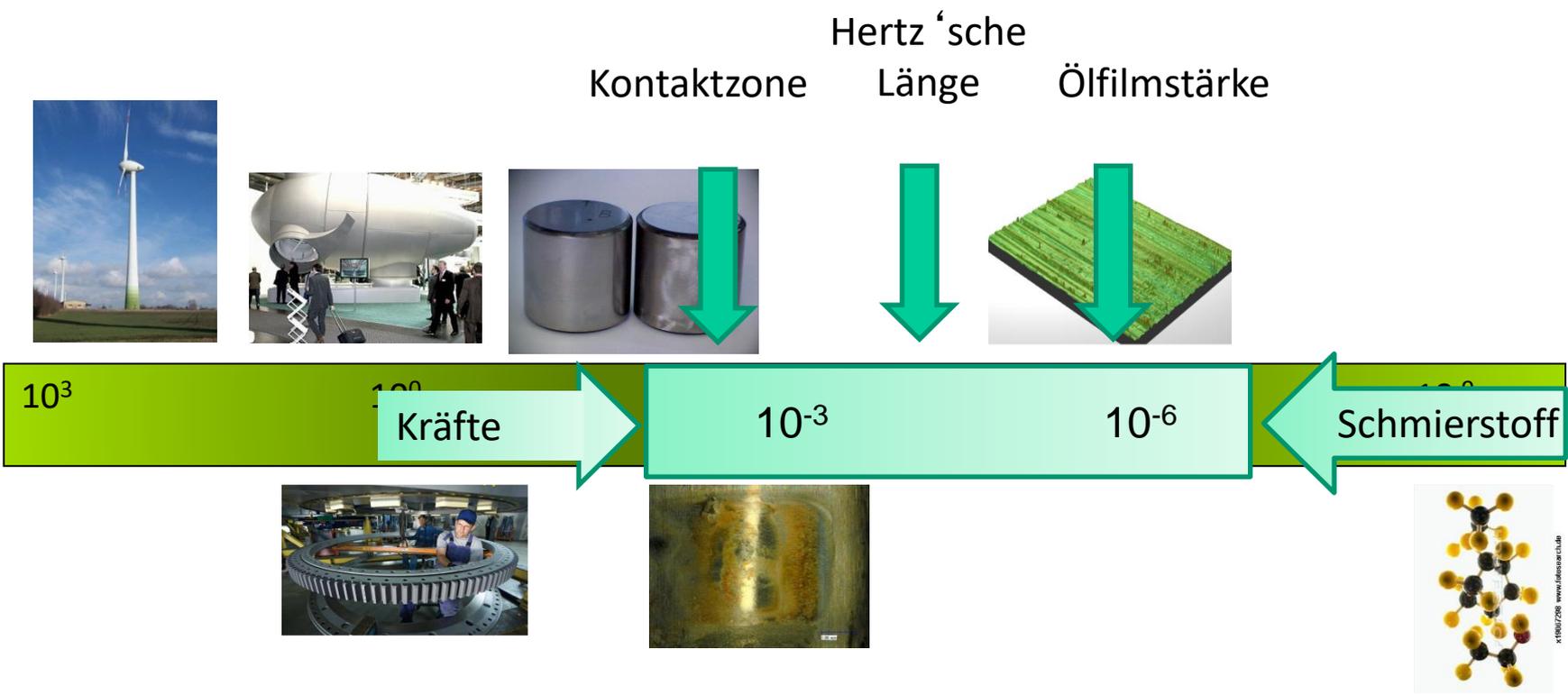
Wälzlagerung



Gleitlagerung

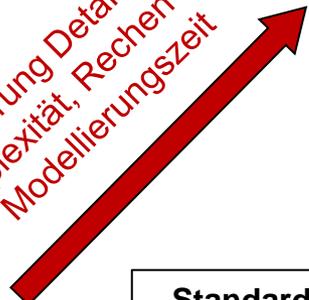
Konkurrenz-
situation

Multiskalensimulation in der Tribologie



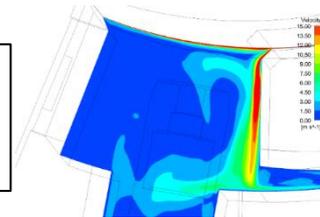
Berechnungsverfahren für Radialgleitlager

Steigerung Detailgrad,
Komplexität, Rechen- und
Modellierungszeit



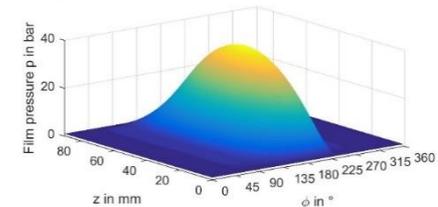
3D CFD-Simulationen
(3D-Navier-Stokes-Gleichungen, exakte Geometrie,...)
$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \mathbf{f}_i - \nabla p + \eta \cdot \Delta \mathbf{v}, \dots$$

Echtzeit: Tage



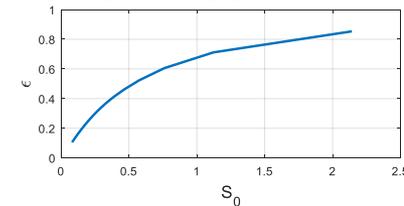
Thermohydrodynamische Berechnungsverfahren
(Reynoldsgleichung, Energiegleichung,...)
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{(U_1 + U_2)}{2} \frac{\partial h}{\partial x}, \dots$$

Echtzeit: Minuten



Standardisierte Berechnungsverfahren
$$h_{min}, T_{max}, p_{max} = f(S_0)$$

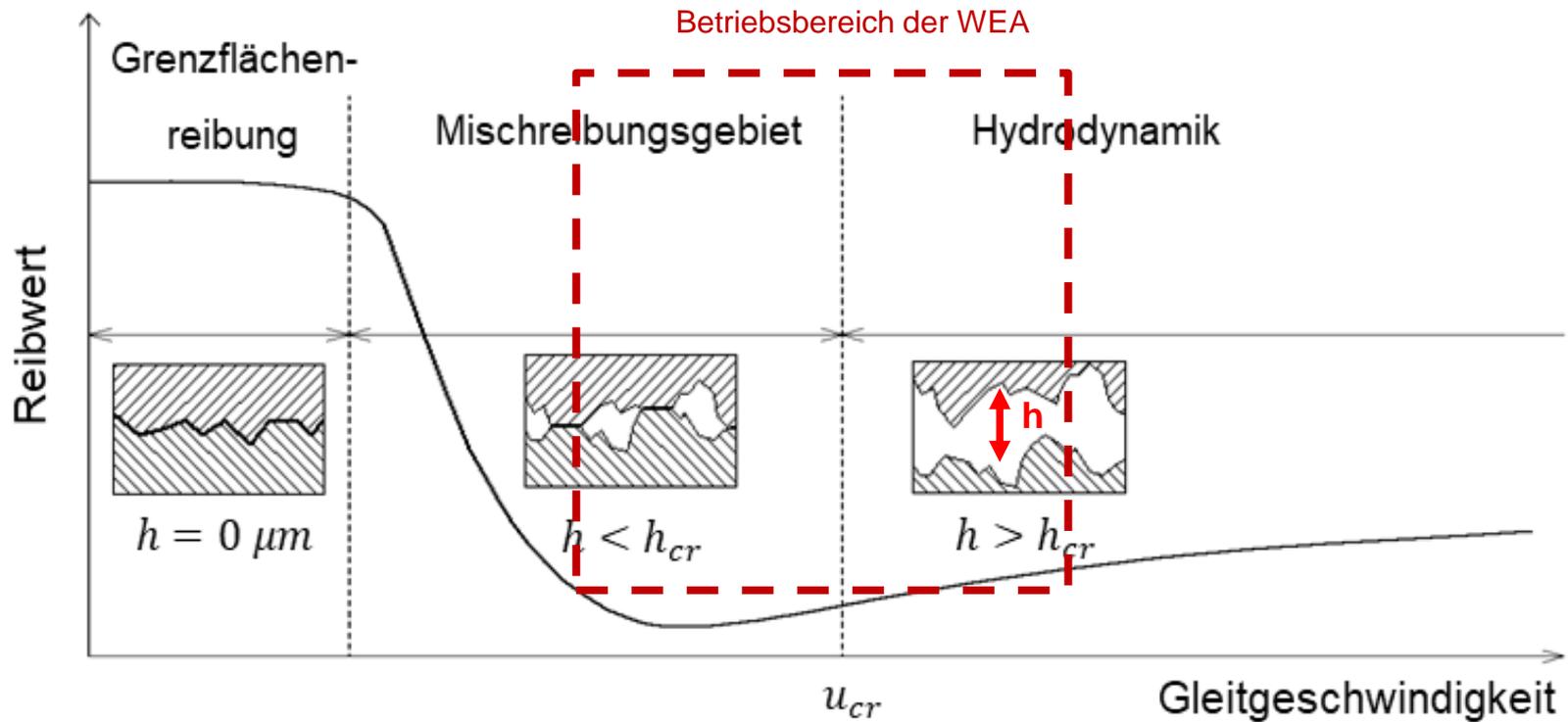
Echtzeit: Sekunden



Regressionsmodelle
$$T_{max} = \alpha \cdot \sqrt{n^{1.7}} \dots$$

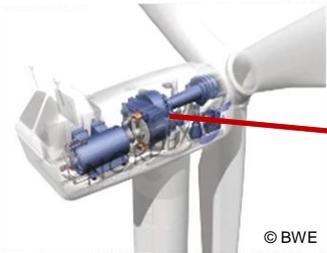
Echtzeit: Sekunden

Stribeckkurve¹⁾



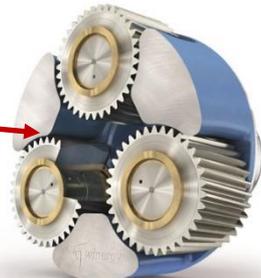
1) Richard Hermann Stribeck, deutscher Maschinenbauingenieur, 1861 - 1950

Beispiele für Planetenradgleitlagerungen



© BWE

Windkraftanlage,
langsam **1-2 m/sec**

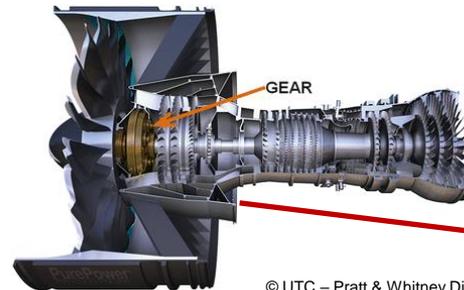


© Winergy



© Voith Turbo

Regelbare Turboplanetengetriebe,
schnell **50-80 m/sec**



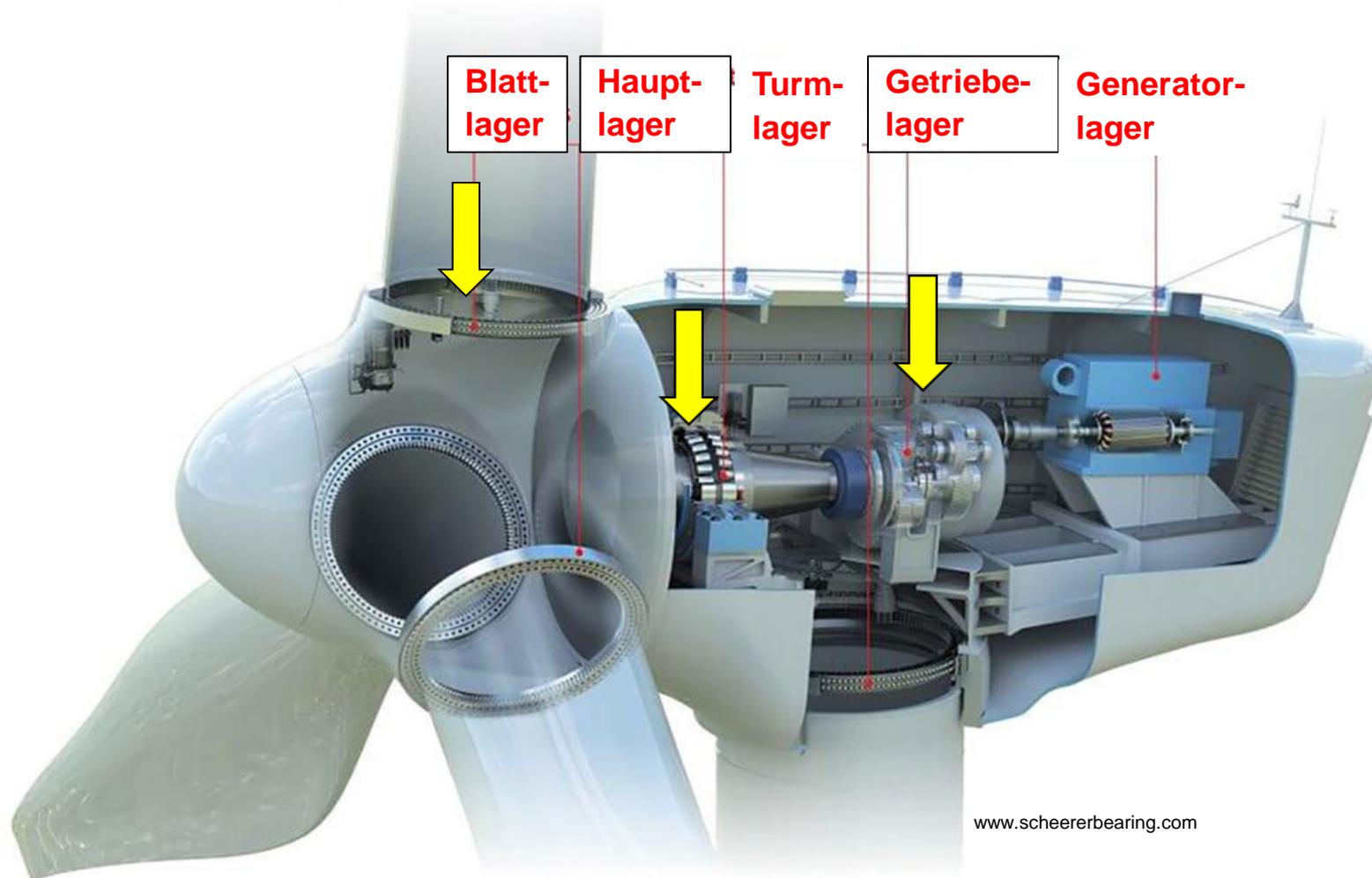
© UTC – Pratt & Whitney Division

Mantelstromtriebwerk für Luftfahrt,
sehr schnell **100 m/sec**

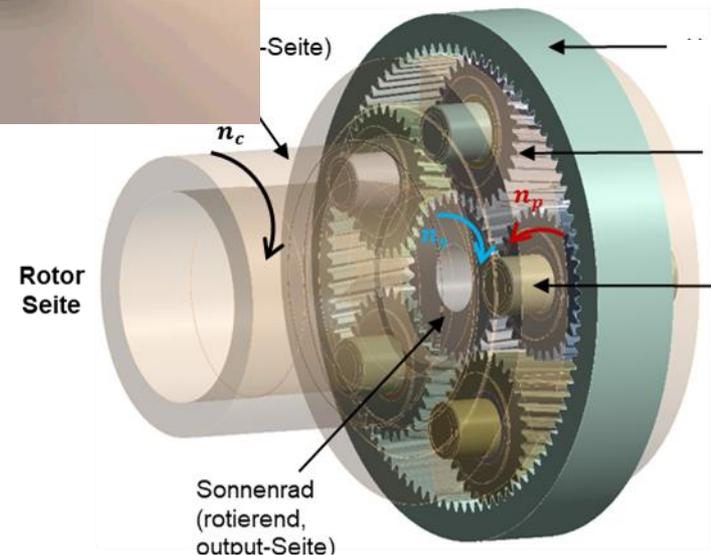
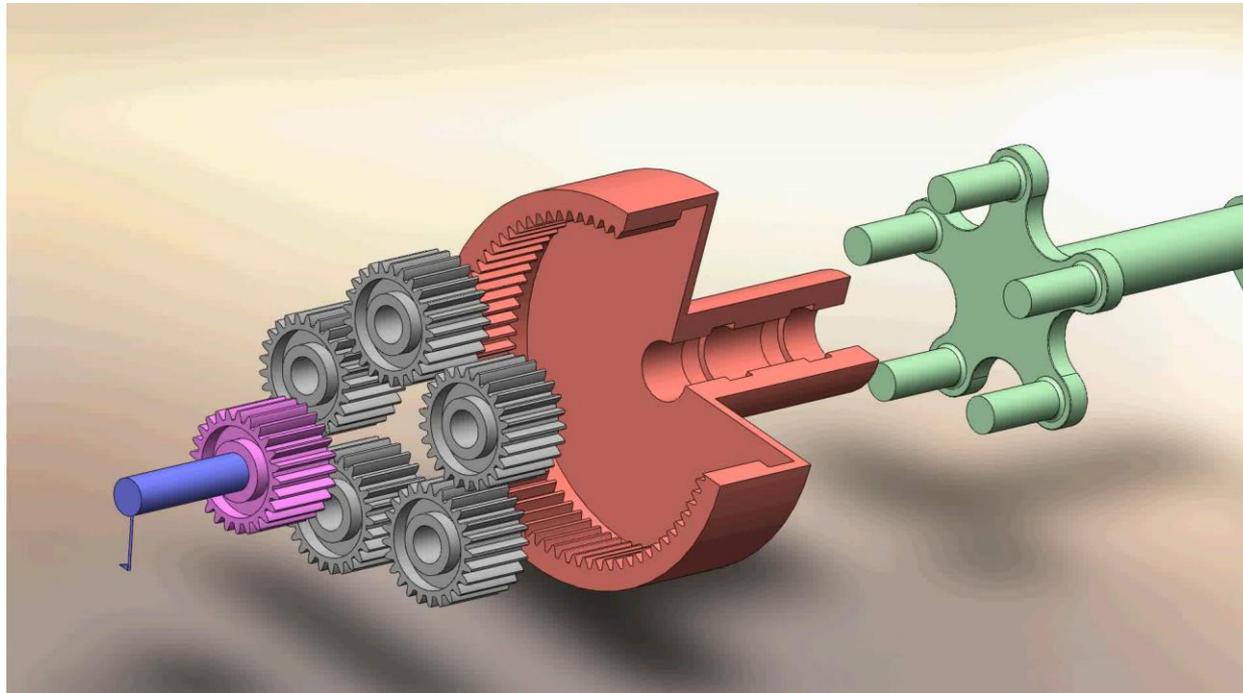


Geschwindigkeit nimmt zu

Lagerungen in einer Windenergieanlage



Funktionsprinzip Planetenradgetriebe



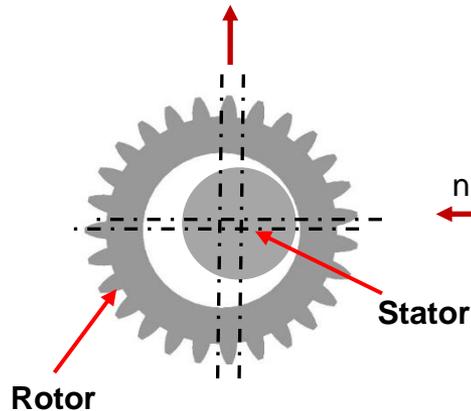
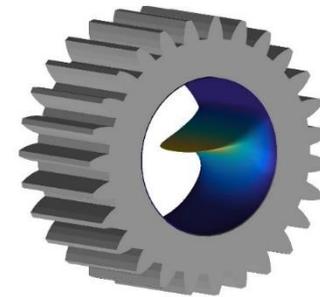
Thermohydrodynamische Modellierung von Gleitlagern

- Ermittlung des **mechanischen Gleichgewichtszustandes**

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{(U_1 + U_2)}{2} \frac{\partial h}{\partial x}$$

h - Schmierpalhöhe (Eingangsgröße)

p - Schmierfilmdruck (Lösungsvariable)

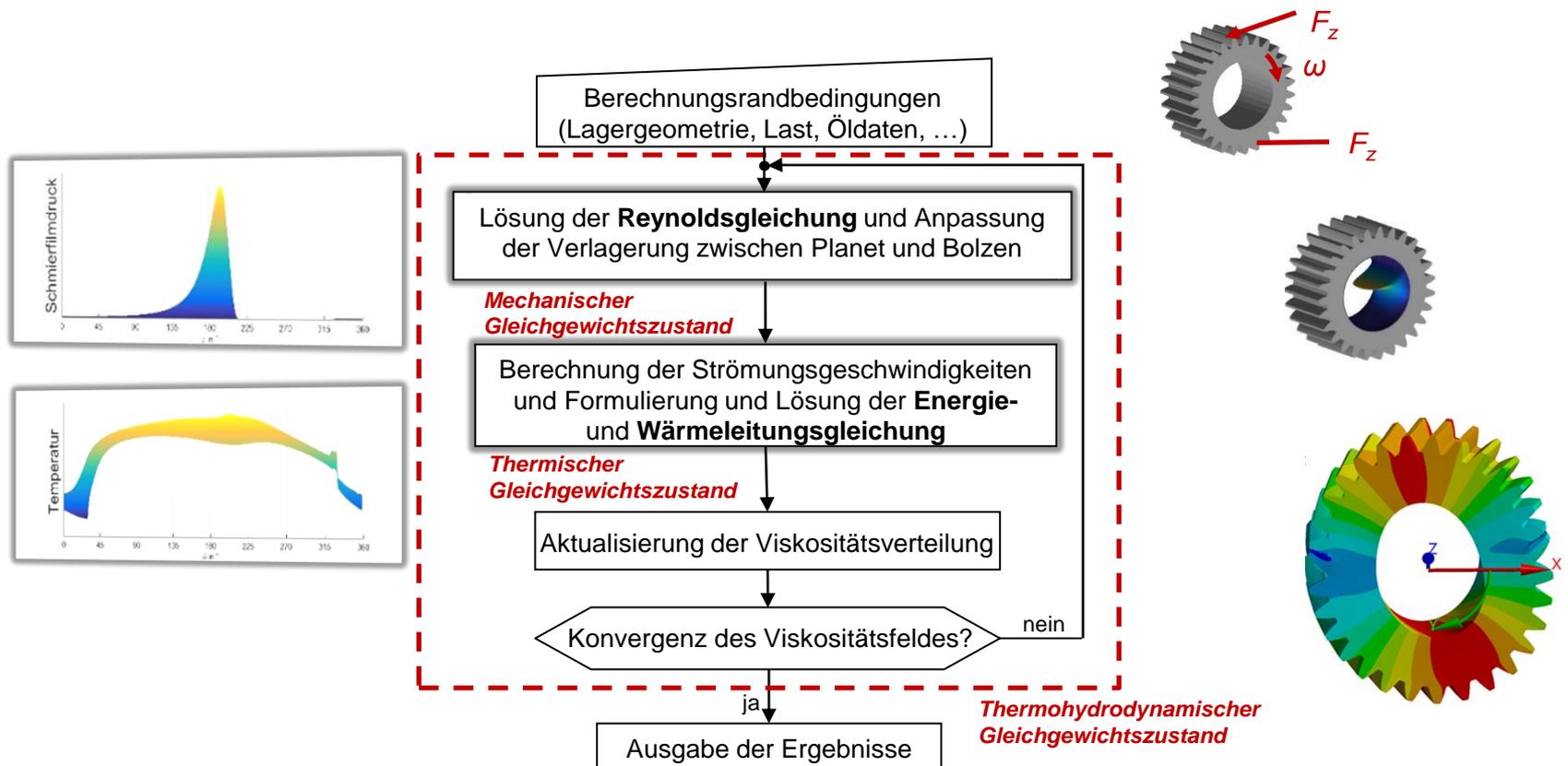


$$\Delta \bar{F} = \left| \frac{F_B - F_{ex}}{F_B} \right| < \varepsilon?$$

$$F_B = \int_{A_{Pl}} p \, dA$$

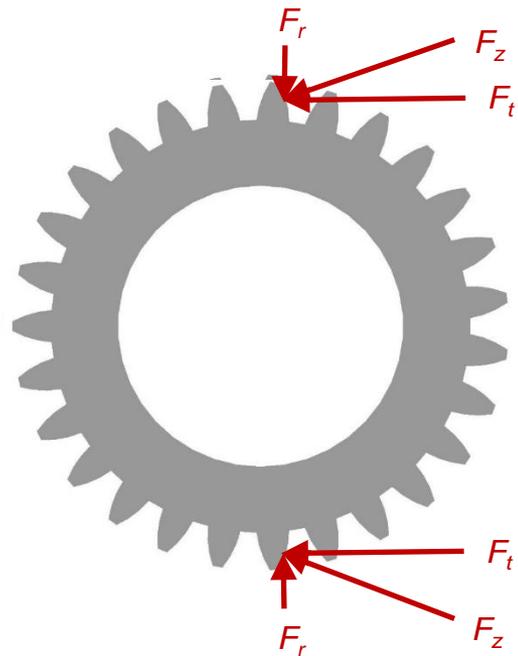
ENDE

Thermohydrodynamisches Lagermodell – Berechnungsstrategie

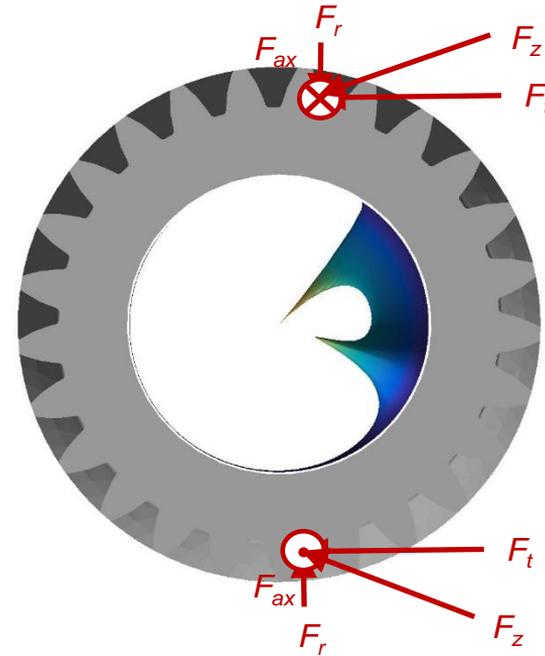


Ergebnisse: Druckverlauf im Gleitlager

Geradverzahntes Planetenrad

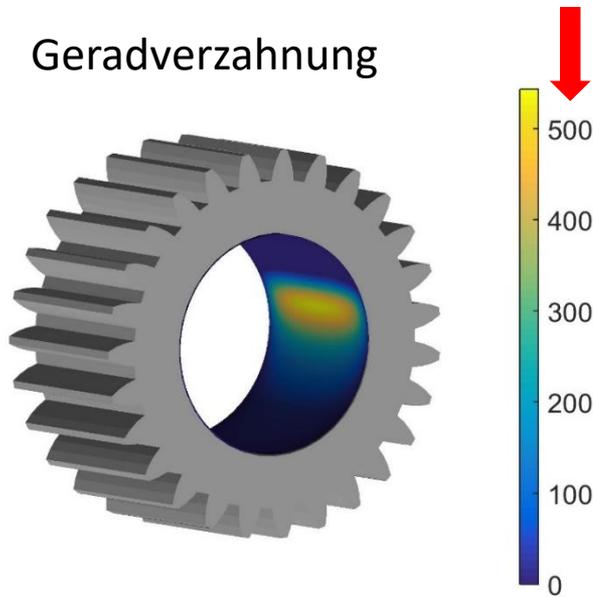


Schrägverzahntes Planetenrad

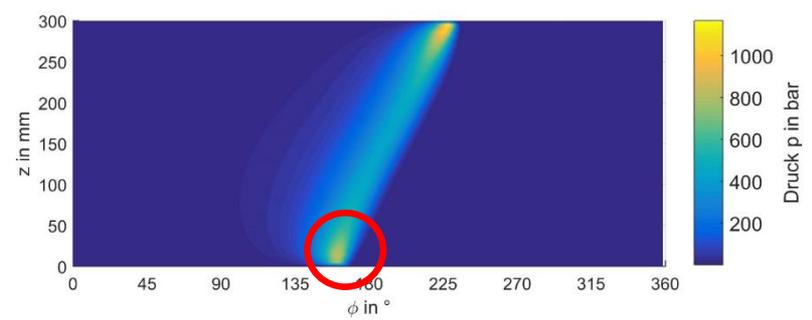
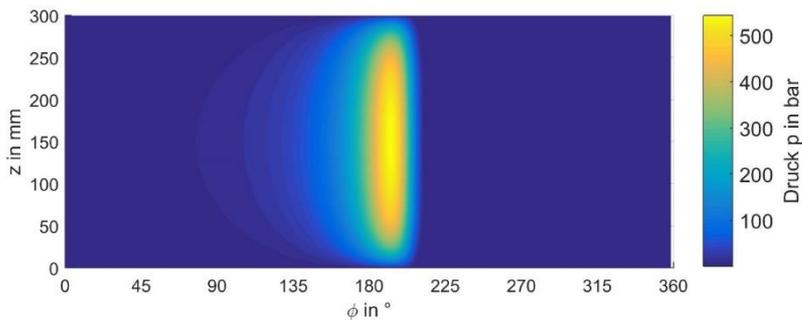
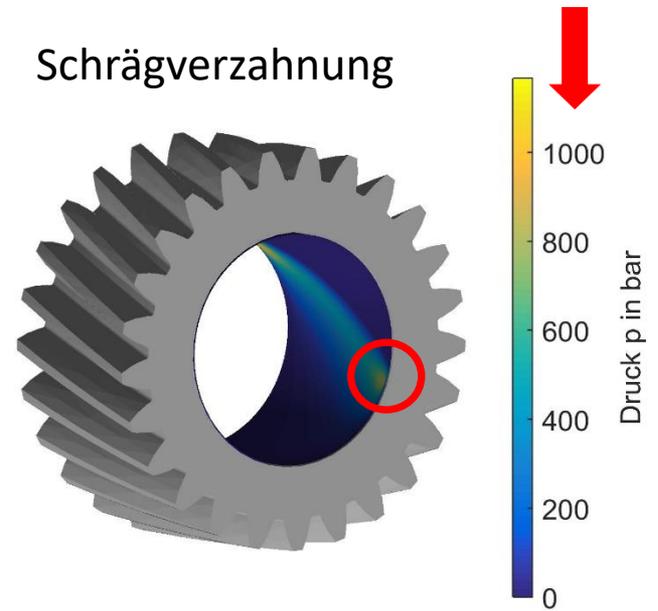


Druckverlauf im Gleitlager

Geradverzahnung



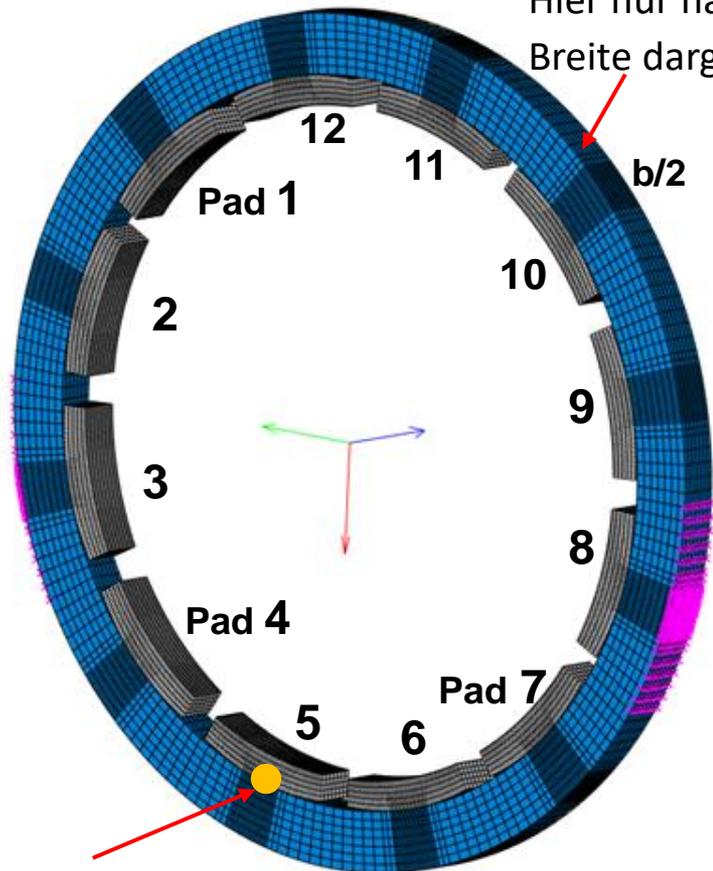
Schrägverzahnung



Rotorhauptlager- Zukunft ab 2027?

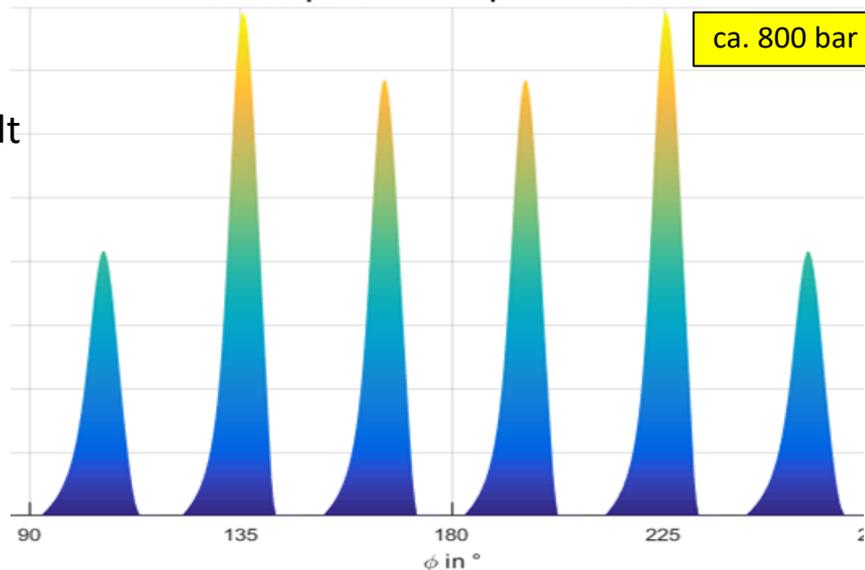
Ø4-5m, 13 MW

Hier nur halbe
Breite dargestellt

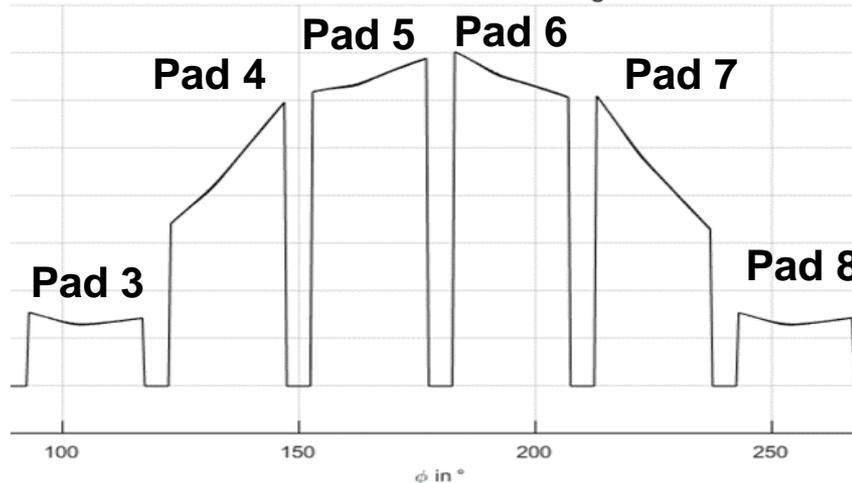


Kugelgelenk
Ausführungsform:
bewegliche, austauschbare
radiale Kippsegmente

Betriebspunkt 1 - n = 8 rpm - F = 11000 kN



Radiale Gleitflächenverformung



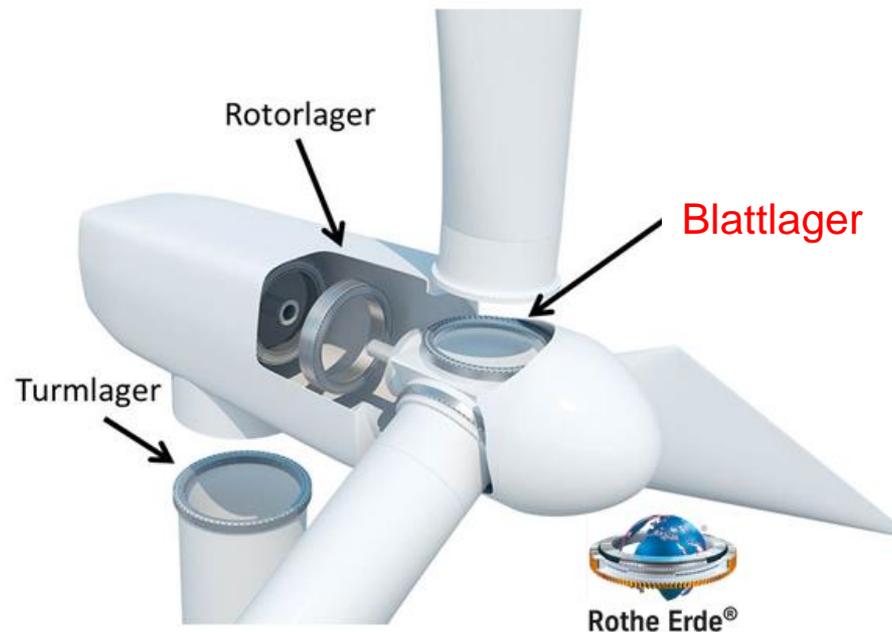


Hochbelastete, fettgeschmierte Wälzlager (Blattlager) unter WEA-typischen „permanent-pitch“ Bedingungen

1. Einführung
2. Riffel-Schwenkprüfstand
3. Ergebnis
4. Auswertung des Schmierfettpotenzials
5. Zusammenfassung

Ziele:

- Funktionsprüfstand zur Beurteilung von Vierpunktkugellagern hinsichtlich Reibkorrosionsverschleiss bei dynamischer Axialbelastung und oszillierendem Schwenkbetrieb („permanent-pitch“)
- Online - Erfassung der Drehwiderstandsänderung infolge tribokorrosiv induzierter Laufbahnschäden
- Bewertung des Schmierfettpotenzials unter Großwälzlager-typischen Betriebsbedingungen



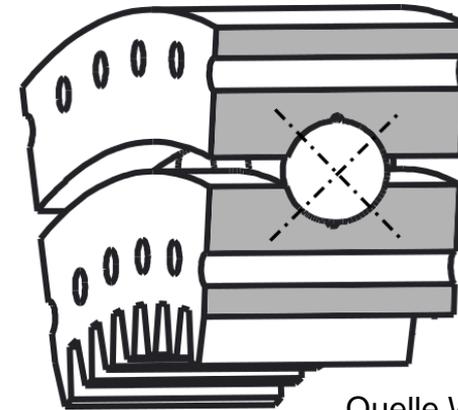
(Quelle: ThyssenKrupp Rothe Erde GmbH)

Vierpunktlager

Rotorblattlager (Pitchlager)

- verbindet die Rotornabe mit dem Rotorblatt
- dient dem Verdrehen der Rotorblätter, um die Leistung zu regulieren (Pitchen).
- Die Pitchregelung wird auch zum Abschalten der Anlage verwendet.
- Das Vierpunktlager nimmt Lasten in beide Richtungen und Biegemomente auf.
- Ein Schmierstoffwechsel bedeutet großen Zeit- und Kostenaufwand.
- Da Schmiermittel muss an Ort und Stelle in der Nabe verbleiben, d.h. es kommt nur ein Fett in Betracht.
- **Heutige Fette haben sehr unterschiedliche Zusammensetzungen und führen nicht immer zum gewünschten Ergebnis, Verschleiß zu verhindern.**

Durch **False Brinelling** geschädigtes Lager mit typischer **Riffelbildung**

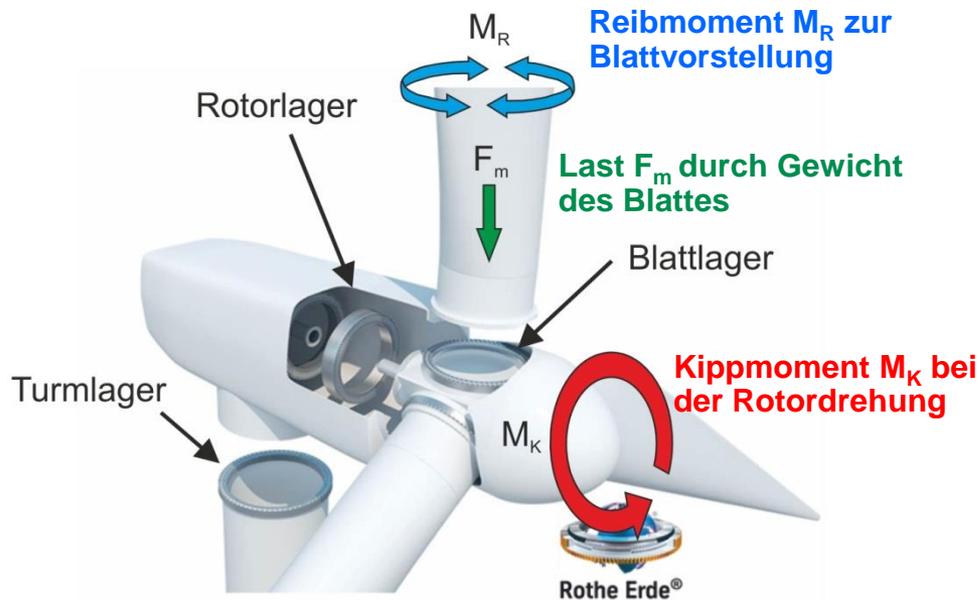


Quelle Wiki

Skizze eines Vierpunktlagers



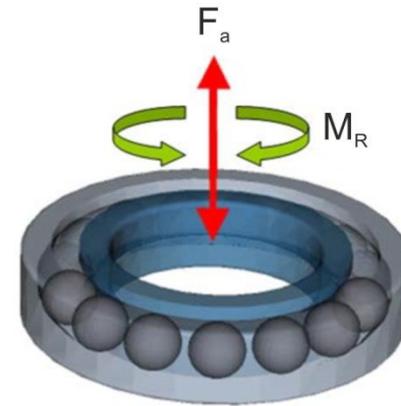
Belastungen in der Blattlageranwendung



(Quelle: ThyssenKrupp Rothe Erde GmbH)

Belastungen am Riffel-Schwenkprüfstand:

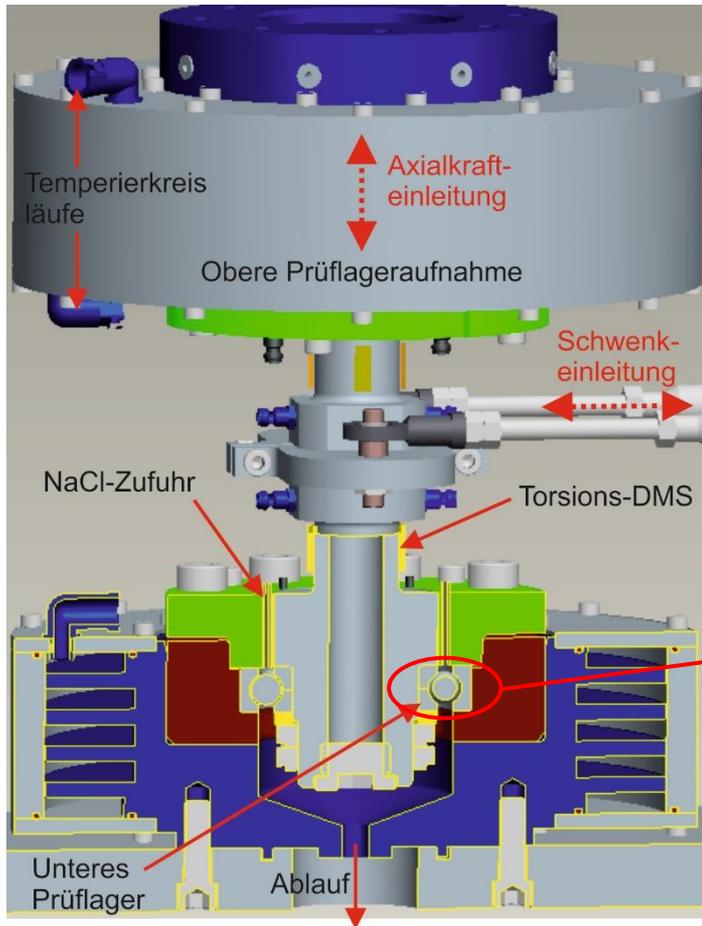
- Dynamische Last in Axialrichtung F_a
- Dynamische Schwenklast in Radialrichtung M_R



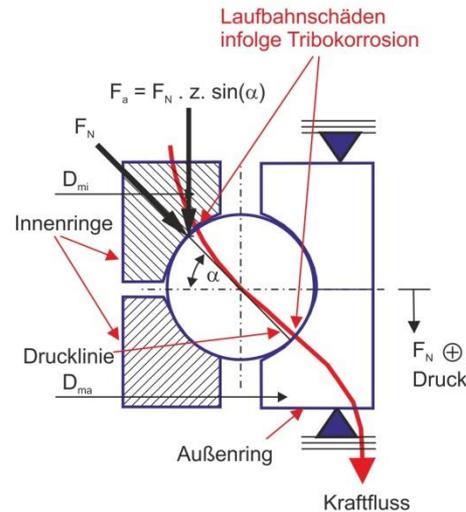
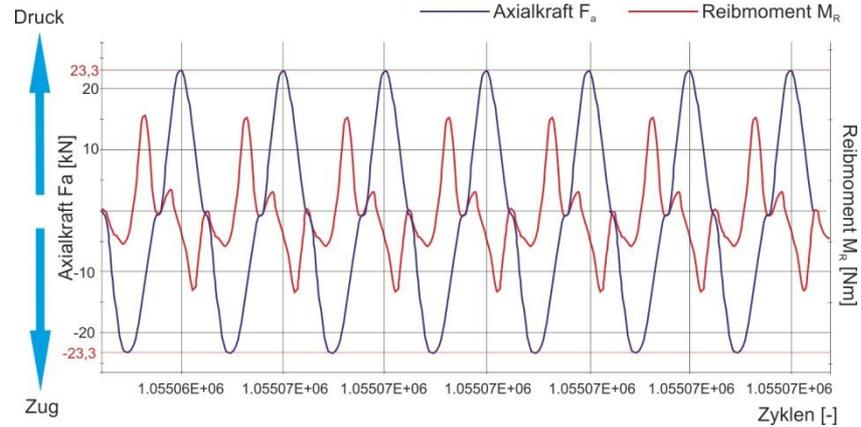
Übertragung der Kontaktverhältnisse vom Blattlager auf Riffel-Schwenkprüfstand

1. Vierpunktlager oder Kugeldrehverbindungen sind vielfach verwendet
2. Radiallast durch Reibmomente bei der Blattverstellung
3. Axiallast durch Kippmoment und Gewicht des Blattes (eine Drehung des Blattes um die Rotorachse entspricht einem wechselnden Kippmoment in der Lagerung)
4. Maximale Flächenpressung von 3 GPa innerhalb der Druckfläche des Kugel/Ring-Kontakts
5. Schwenkweite des GWL von 2° (Schwenkwinkel $\pm 1^\circ$)
6. Korrosive und temperaturschwankende Umgebung

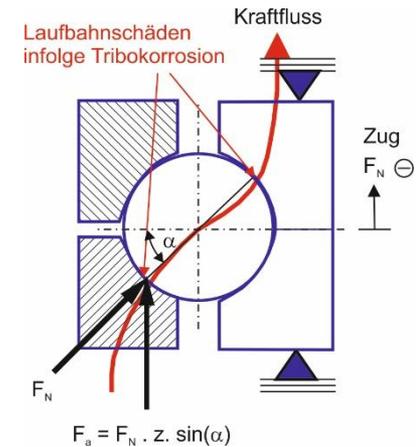
Konzept Riffel-Schwenkprüfstand



1. Einführung



α : Betriebsdruckwinkel
 F_a : Axialkraft



z : Kugelanzahl

Mit Hilfe des Steuergeräts werden der Schwenkweg und die Pulseraxialkraft synchronisiert ; d.h. max. Zug- und Druckkraft treten jeweils in der Mittelstellung der Schwenkbewegung auf.

Riffel-Schwenkprüfstand



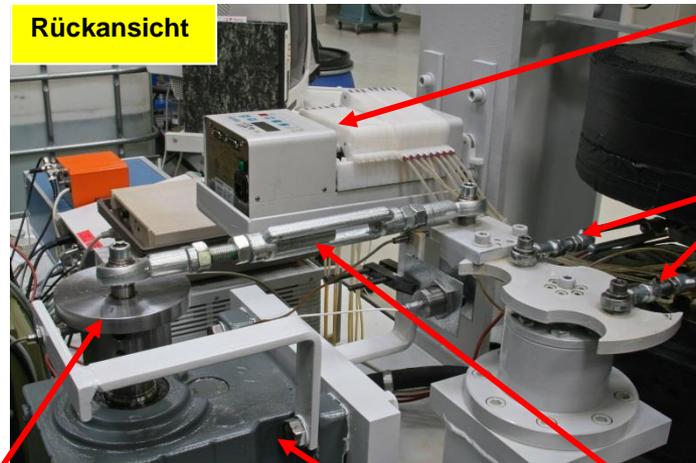
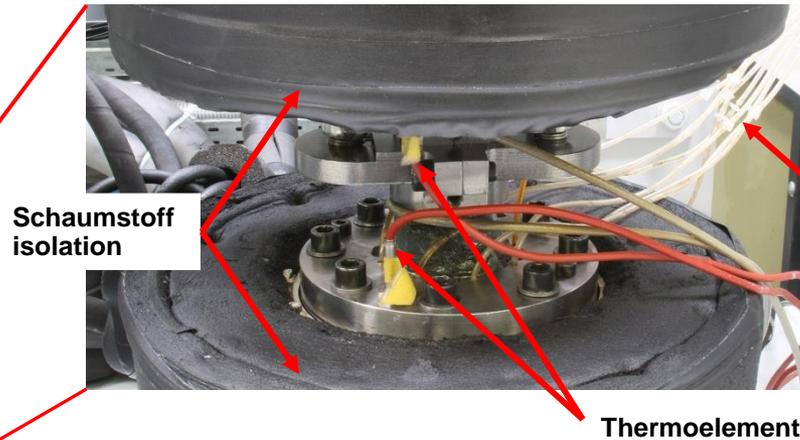
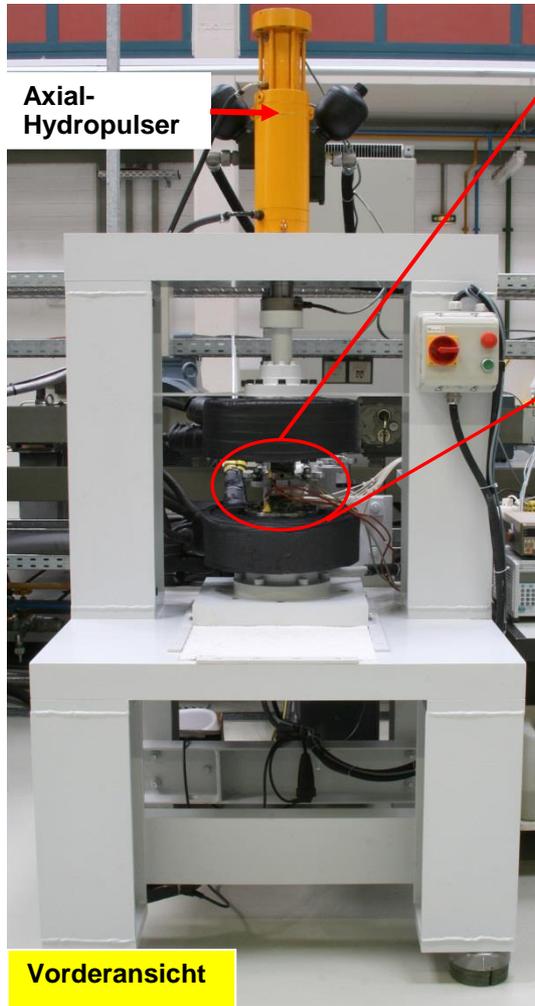
Ergebnis:

1. Zeitlicher Verlauf des Drehwiderstands (d.h. Schwenk- bzw. Reibmoment)
2. Vermessung der Schadenstiefe

Prüfstands-Daten:

- Zwei Prüflager können gleichzeitig in einem Versuch ausgeführt werden (mit / ohne NaCl-Kontamination)
- Dynamisch axial belastete Vierpunktkugellager im oszillierenden Schwenkbetrieb („permanent-pitch“)
- Gesamtaxiallast (max. Amplitude) 23,3 kN bei 5 eingesetzten Wälzkörpern; max. Flächenpressung: ca. 3000 N/mm² am Innenring
- Schwenkwinkel Welle: +/-4,6° (Schadensbereich 10 x b_{Hertz})
- Schwenkfrequenz: 7Hz (Versuchsdauer je Prüflauf: ca. 43h)
- Soll-Lastzyklenzahl: 1,1 Mio. bis Versuchsabbruch
- Last – Schwenk – Synchronisation einstellbar
- Käfigwandern konstruktiv unterbunden (Ziel: der Lagerring wird innerhalb des Prüfzyklus an definierter Position belastet)
- Temperierung ist möglich (Temperaturbereich: $\vartheta = -15 \dots 60$ °C) ; Standardtest-Temperatur: $\vartheta = 20$ °C
- NaCl-Kontamination: 40gr NaCl auf 3960ml H₂O (1% NaCl)
- Injektion der NaCl-Lösung an 8 Stellen im unteren Prüflager (8 x 0,75 ml/min NaCl-Lösung)
- Automatische Steuerung der Anlage und automatische Datenaufnahme der Messung

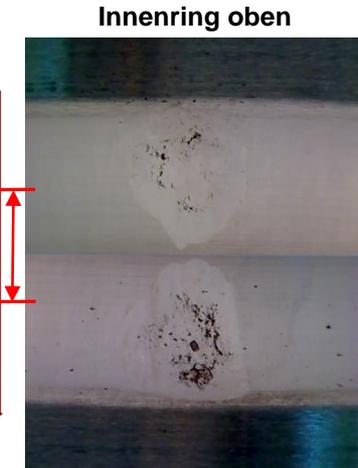
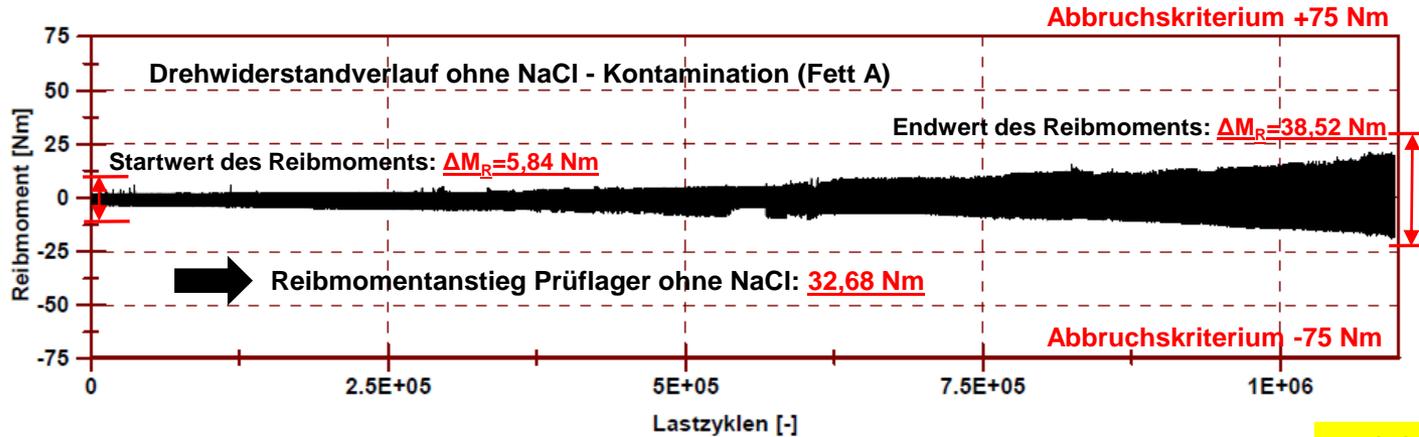
Riffel-Schwenkprüfstand



Oszillierende Bewegung (radiale Belastung) erfolgt über modifizierten Kurbeltrieb.

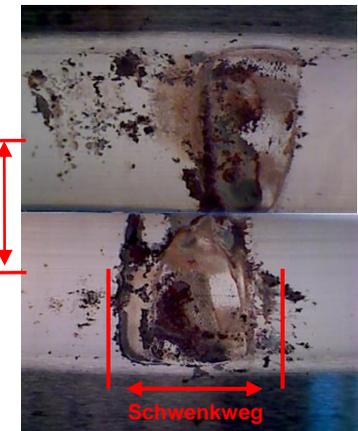
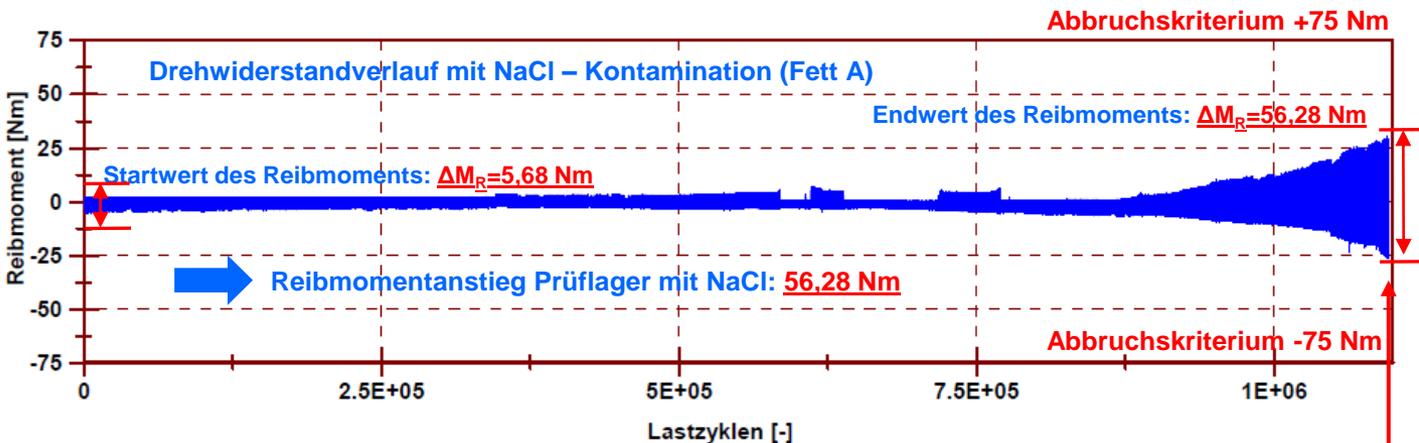
Ergebnisbeispiel Riffel-Schwenkprüfstand

1. Zeitlicher Verlauf des Drehwiderstands (d.h. Schwenk- bzw. Reibmoment)



$\mu \approx 0,04$

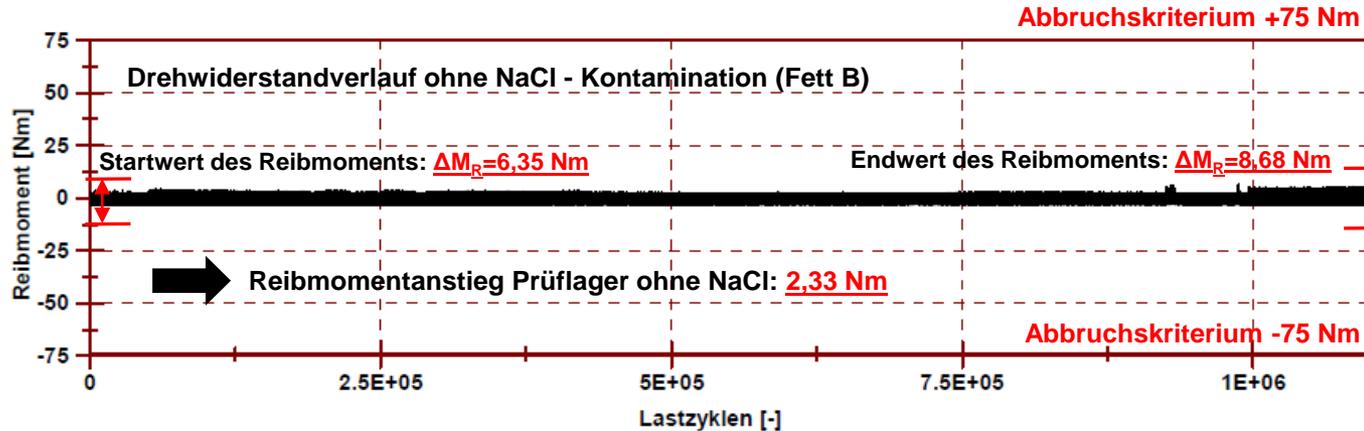
Innenring unten
Innenring oben



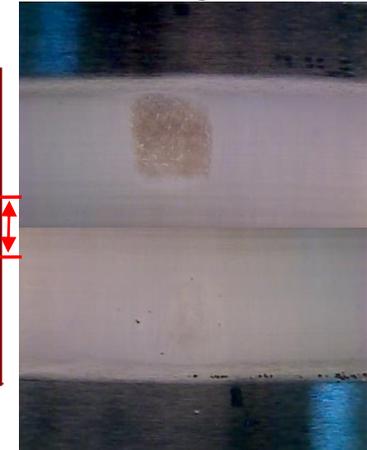
Reibkoeffizient $\approx 0,07$

Ergebnisbeispiel Riffel-Schwenkprüfstand

1. Zeitlicher Verlauf des Drehwiderstands (d.h. Schwenk- bzw. Reibmoment)

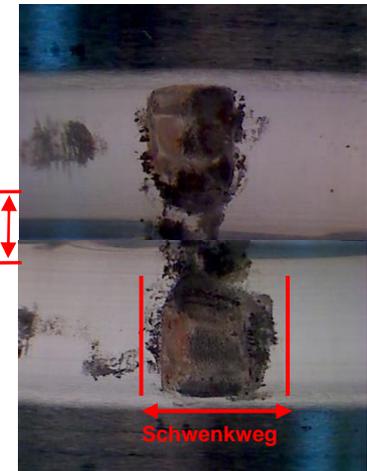
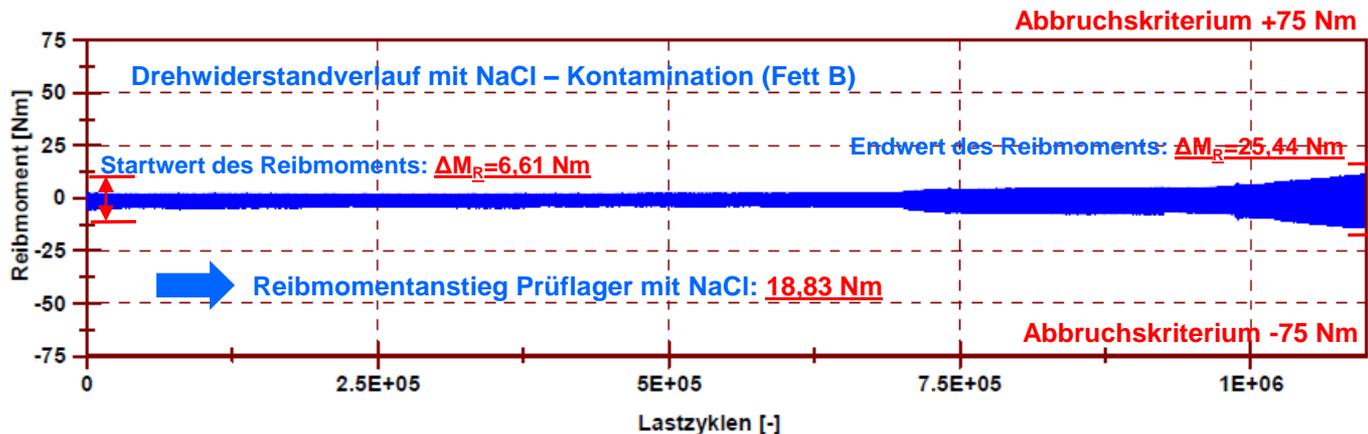


Innenring oben



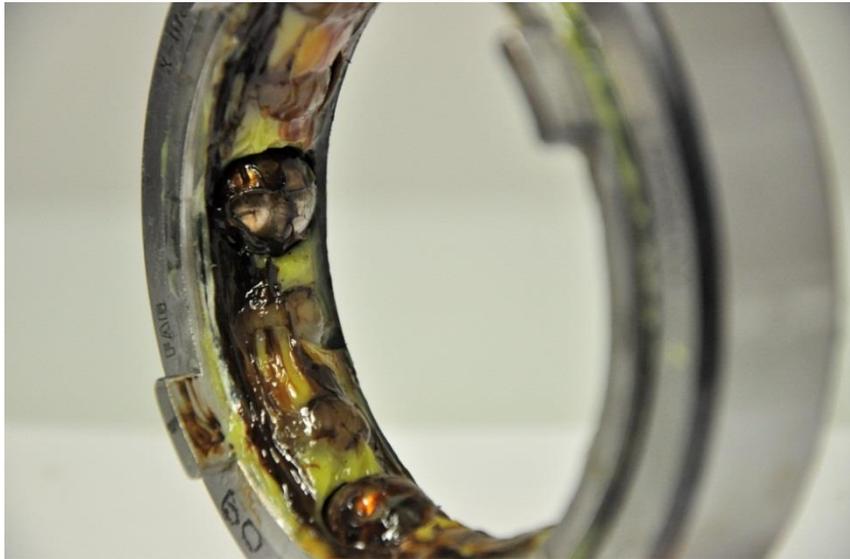
Innenring unten

Innenring oben



Innenring unten

Schadensbilder der Wälzlager



Oberes Prüflager (ohne NaCl)



Unteres Prüflager (mit NaCl)

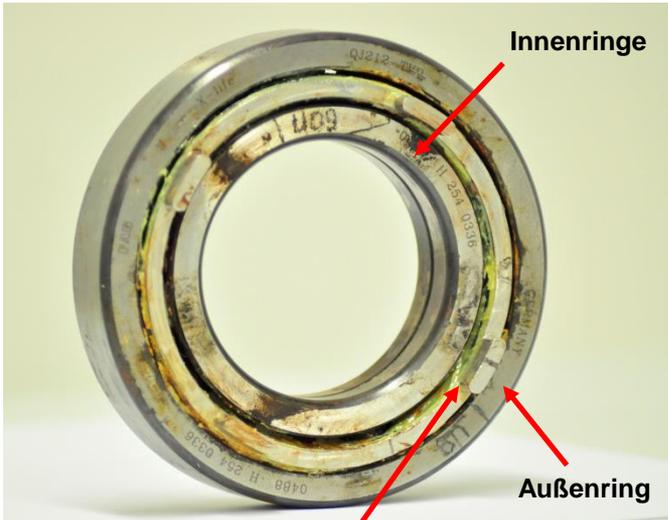


Schadensbilder der zweiteiligen Innenringe

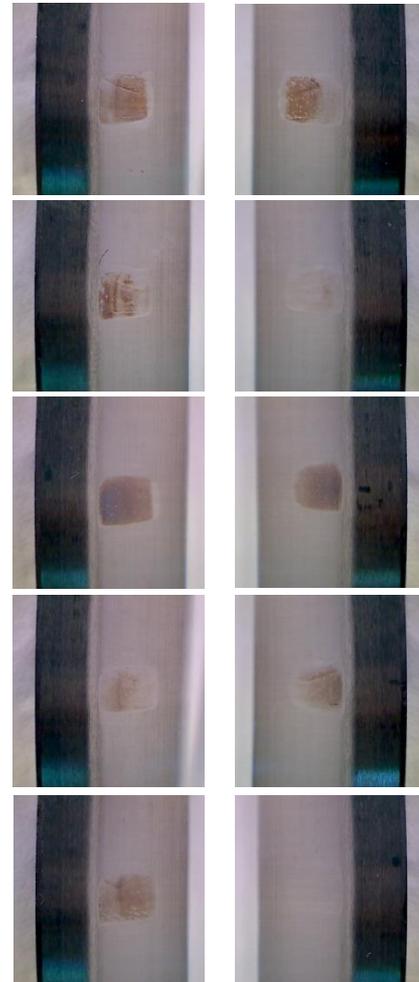
Kugelposition

Oberer Innenring Unterer Innenring

Oberer Innenring Unterer Innenring



Modifizierter Käfig



Oberes Prüflager (ohne NaCl)

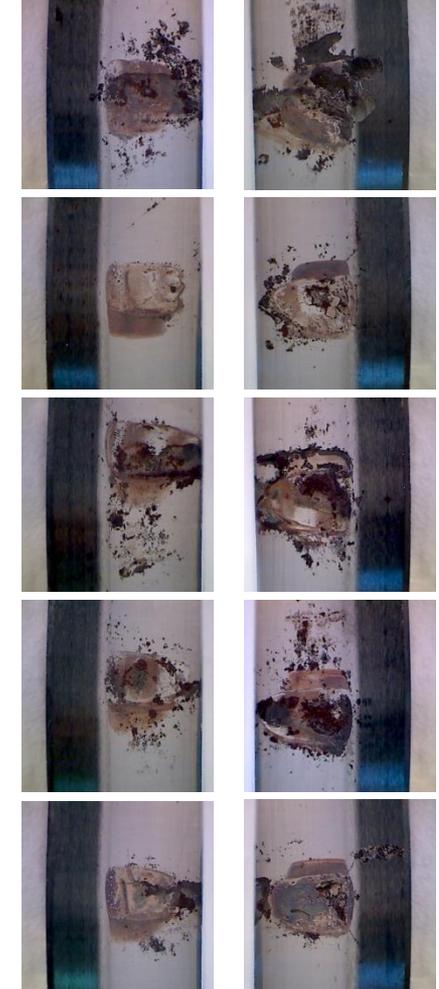
I

II

III

IV

V



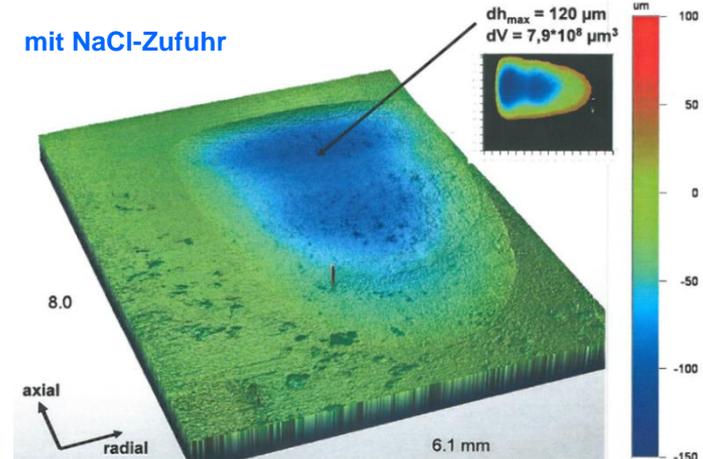
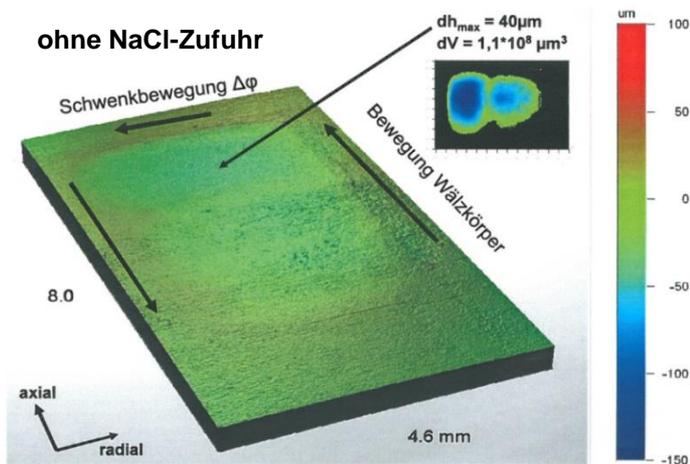
Unteres Prüflager (mit NaCl)

Vermessung der Schäden mittels Weisslichtinterferometrie

2. Vermessung des Schadensbildes (Verschleißvolumen, -tiefe, -fläche)



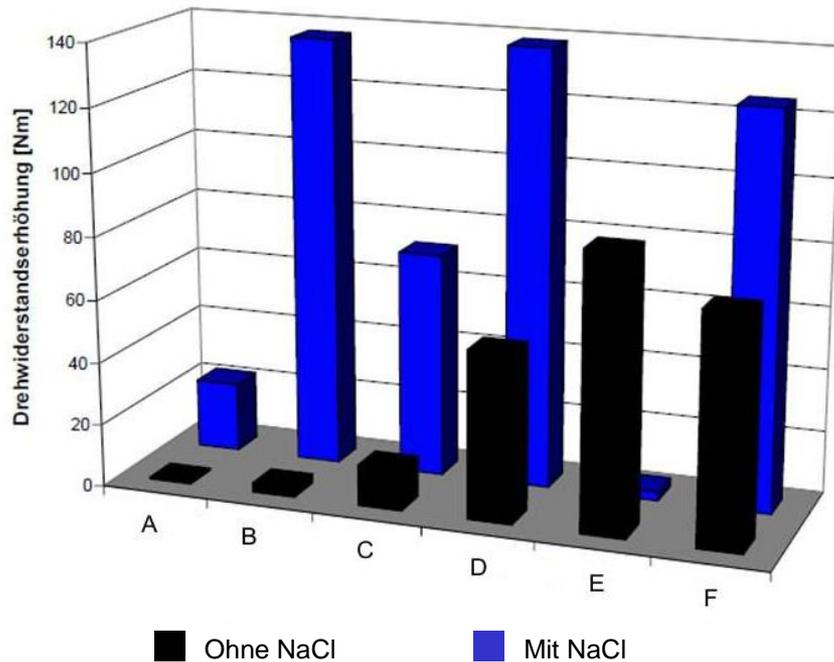
- Einscannen realer Oberflächentopografien mittels hochauflösender Weisslichtinterferometrie am ITR
- Bilderaufnahme des Schadens in Querrichtung (x-Richtung), Längsrichtung (y-Richtung) und Tiefenrichtung (z-Richtung)
- Durch das Zusammenfügen von Bilderaufnahmen werden Schadenstiefe, Schadensfläche und Schadensvolumen als Ergebnis erfasst
- Dieses Messfahren ist zeitintensiv



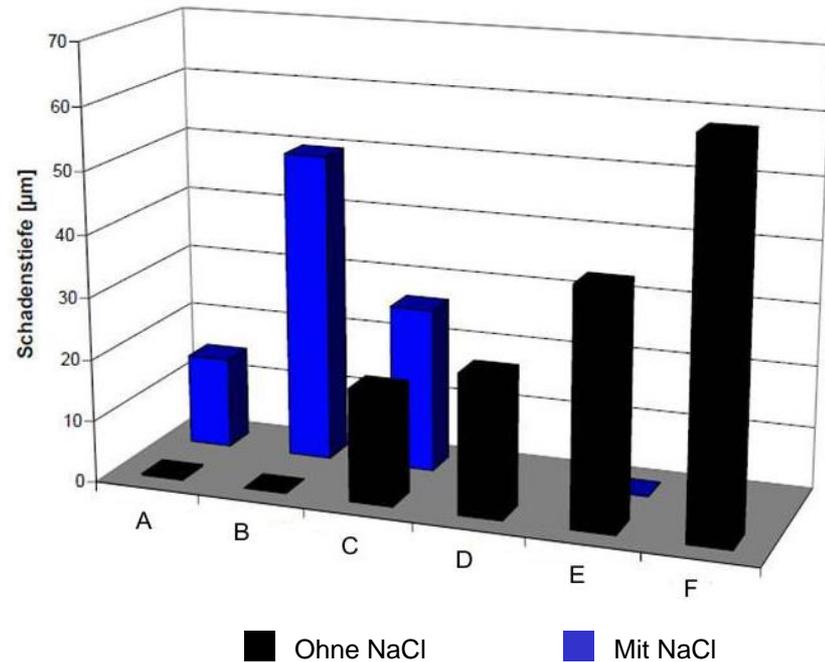
Vergleich der Schmierfettpotenziale

- Vergleiche der gemessenen Drehwiderstandserhöhung und der mittleren Schadenstiefen mit und ohne NaCl-Kontamination in Balkendiagrammform

Vergleich der Drehwiderstandserhöhung

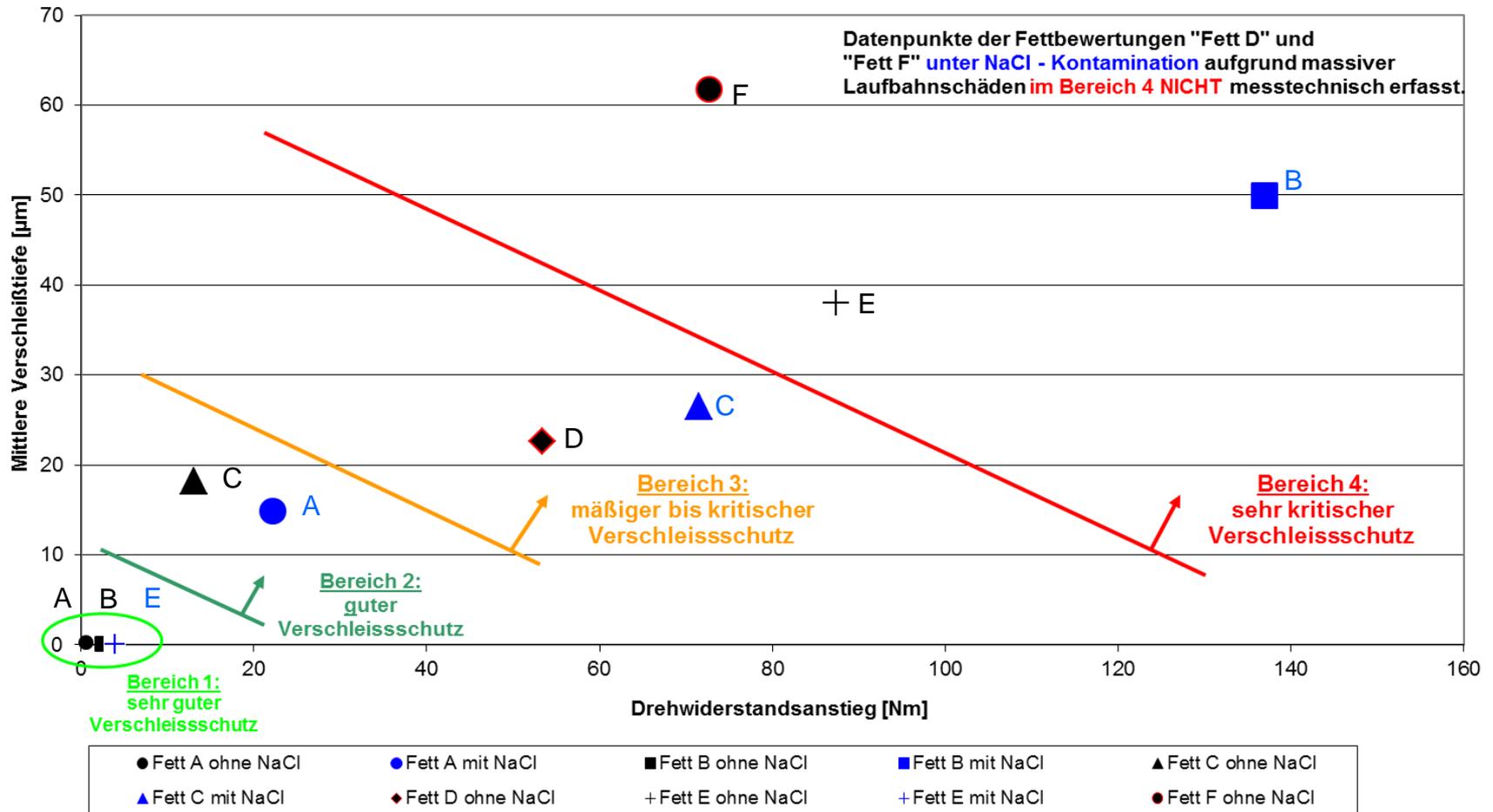


Vergleich der mittleren Schadenstiefen



ITR Ranking der untersuchten Schmierfette

- ITR Ranking der untersuchten Schmierfette -
Kennfeld: Mittlere Verschleißtiefe über Drehwiderstandsanstieg



Zusammenfassung:

- Bewertung der bei Großwälzlagern eingesetzten Schmierfette mittels des Riffel-Schwenkprüfstands bei Vierpunktkugellagern im permanent-pitch Betrieb mit / ohne Salzwasserkontamination
- Anhand der quantitativen Bewertungskriterien lassen sich die Schmierfette bewerten hinsichtlich der Minimierung von Tribokorrosionsverschleiß
- Mit dieser realitätsnaher Fettprüfung erhalten Schmierfettproduzenten und -anwender wichtige Informationen zu Schmierfetten. Damit können Maßnahmen zur Minimierung von Tribokorrosionsverschleiß eingeleitet werden.

Ausblick:

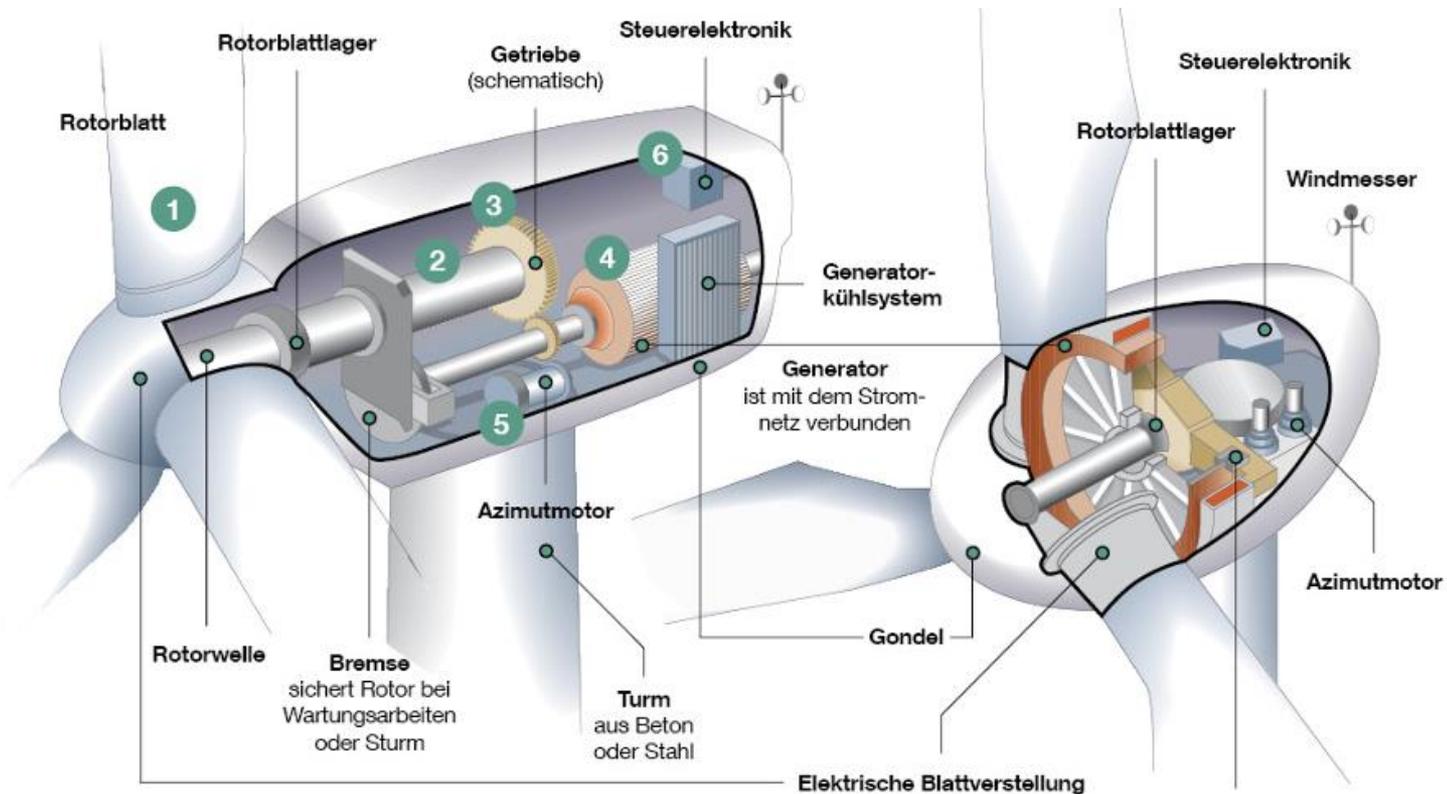
- Einfluss von Additiven auf das Tribokorrosionsverschleiß - Verhalten kann durch chemische Analyse der Fettproben bzw. Analyse der Lageroberflächen durchgeführt werden, Aufgabe für zukünftige Untersuchungen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Institut für Tribologie und Energiewandlungsmaschinen
Leibnizstr. 32
38678 Clausthal-Zellerfeld

Zwei unterschiedliche Bauweisen w/wo Getriebe

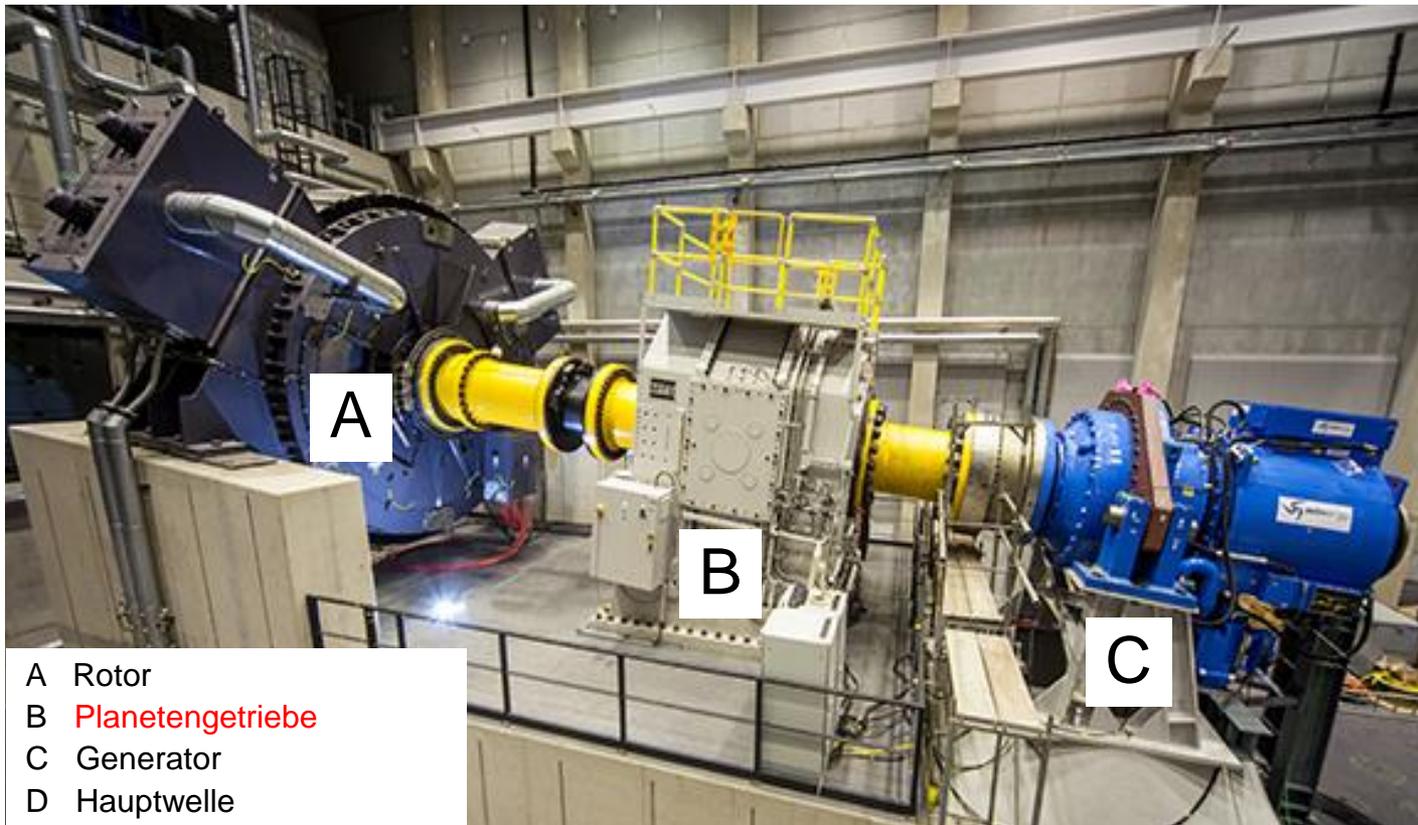


[InnovationSaubere Umwelt, Nov.2021](#)

Getriebeloser Direktantrieb: weniger Teile, bis $0,3 P_{\text{nenn}}$ weniger Leistungsverlust und besserer η , da Synchr.geno Permanentmagnete besitzt, anstelle der üblichen Elektromagnete, Geno wird groß und schwer, teuer, Cu, Magnetmaterial

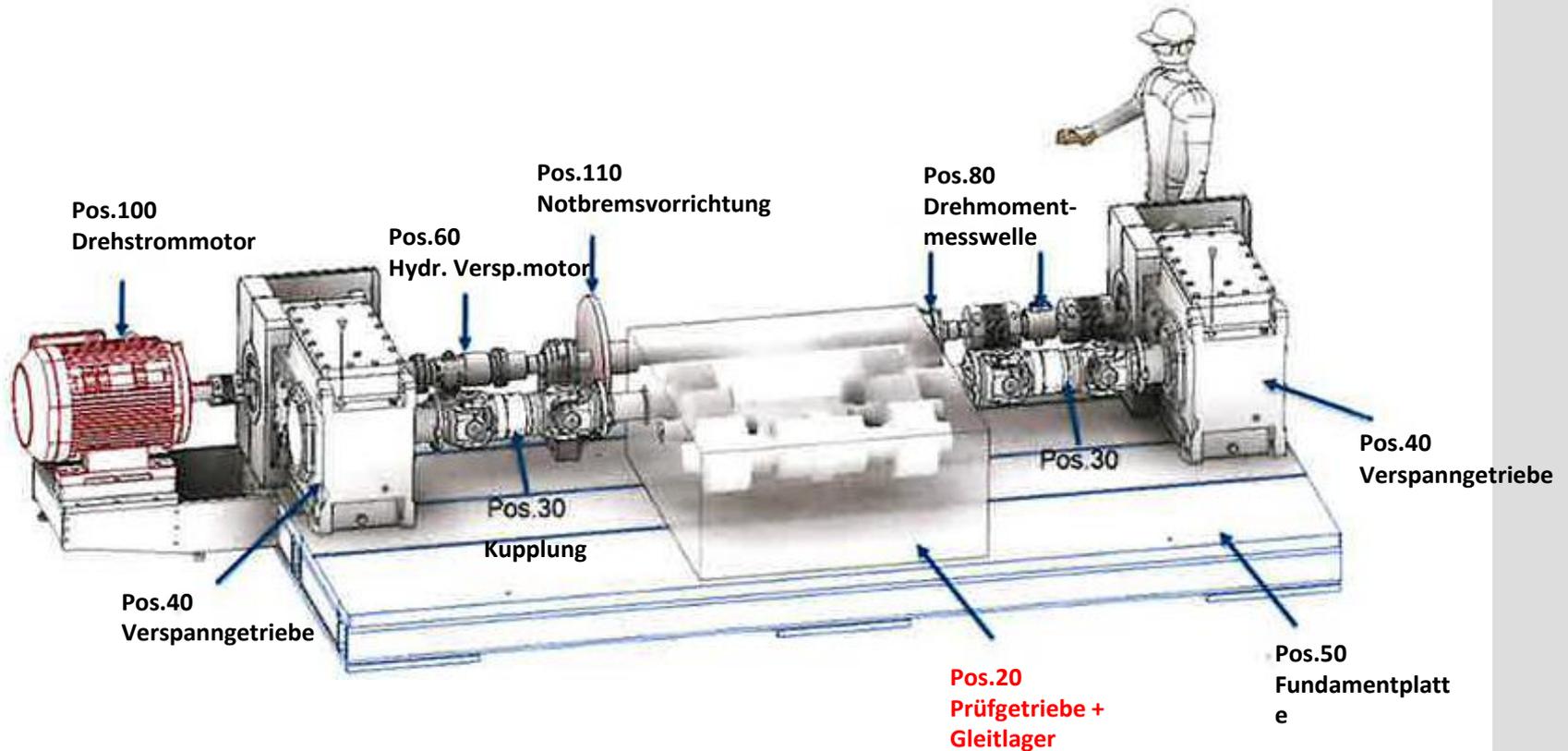
WEA mit Getriebe: Geno klein, günstig, Getriebe weit verbreitet, klassisches System im Mb

Konzept mit Getriebe



© IMSE CWD Aachen, 4 MW Pstd.

Planetenradgleitlagerprüfsystem Juni 2023



Oszillationsmessung im Hochdruckrheometer



Quarzsensoren



